

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ИСТОЧНИКА ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А., Ал Ас Талал  
Донецкий государственный технический университет  
svf@elf.dgtu.donetsk.ua

*The mathematical model of independent system of electrosupply with a source of the limited capacity is developed. All elements are described by the complete differential equations. In asynchronous engines the phenomena of replacement of currents in a rotor and saturation of magnetic circuits are taken into account. For emergency operation of independent system the account of optimum sequence of start of asynchronous engines is made.*

Вопросам анализа стационарных и переходных режимов работы асинхронной нагрузки в автономных системах электроснабжения посвящены работы [1-3]. Однако, в этих работах методы анализа указанных режимов производится при ряде допущений на основе уравнений, справедливых для стационарных режимов. Это затрудняет анализ режимов работы, например, при отклонениях питающего напряжения и частоты, при кратковременных нарушениях электроснабжения, а также при анализе режимов группового пуска и самозапуска, что имеет место в автономных энергетических системах с использованием источников ограниченной мощности. В связи с дефицитом топлива энергосистема Украины сейчас также часто работает при пониженной частоте и поэтому вопрос анализа режимов работы асинхронной нагрузки при ненормированных напряжениях питания является актуальным.

Автономные энергосистемы широко применяются для аварийного электроснабжения на тепловых и атомных электростанциях, на крупных промышленных предприятиях (металлургических, химических заводах, угольных шахтах и др.), а также на транспорте и др. Основными элементами таких автономных энергосистем являются синхронный генератор, группа асинхронных двигателей и статическая нагрузка. Типовая схема автономной энергосистемы, используемая, например, на электростанциях для аварийного энергоснабжения, приведена на рисунке 1 и она состоит из питающего генератора Г с напряжением  $U$  и частотой  $f$ , пяти секций  $C1 - C5$ , к которым подключены линии связи  $L1 - L5$  с соответствующими сопротивлениями  $R_{л1}$  и  $X_{л1}$ . К каждой из секций  $C2 - C5$  подключены группы асинхронных двигателей АД и статическая нагрузка с сопротивлениями  $R_n$ ,  $X_n$ .

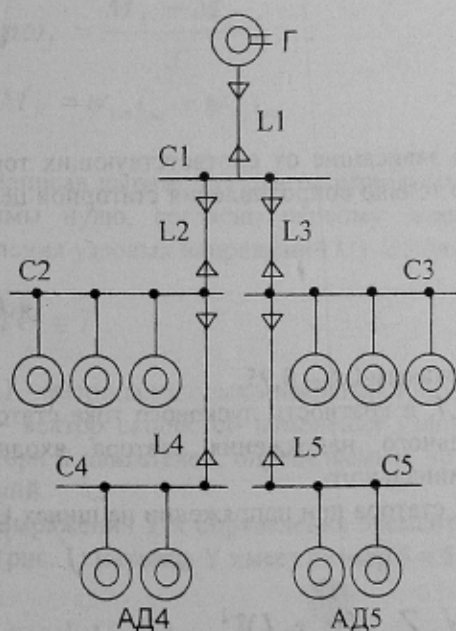


Рисунок 1 – Принципиальная схема системы электроснабжения с двигательной нагрузкой

двигателях в форме каталожных, коэффициенты загрузки приводимых механизмов, зависимости моментов сопротивления механизмов от частоты вращения.

Наиболее сложную зависимость параметров от напряжения и частоты имеют асинхронные двигатели, от точности представления которой во многом зависят результаты расчетов. Особенностью режимов пуска и самозапуска АД является то, что их скольжение в этих режимах изменяется в широком диапазоне. Так как

Как на стадии проектирования, так и в эксплуатации возникает необходимость в анализе следующих режимов работы автономных энергосистем:

- формирование оптимальных очередей запуска АД для набора нагрузки за минимальное время в аварийных режимах;
- допустимость применения частотного запуска АД от генератора, если первичный двигатель допускает режимы при глубоком понижении напряжения и частоты в случае использования автономной энергосистемы для аварийного энергоснабжения;
- анализ группового самозапуска двигателей при кратковременных понижениях напряжения;
- определение тока подпитки места короткого замыкания от генератора и электродвигателей;
- минимизация потерь в электрической системе с целью уменьшения расхода топлива при заданных коэффициентах загрузки механизмов.

В данной работе, в отличие от известных [1-3], рассматривается анализ указанных выше режимов с помощью разработанной математической модели, в основу которой положены полные дифференциальные уравнения генератора, двигателей и линий связи. В качестве исходных принимаются: данные о генераторе и

сопротивления ротора зависят от частоты тока в роторе, то наиболее целесообразно принять для АД схему замещения с многоконтурным ротором, в котором обеспечивается учет эффекта вытеснения токов в роторе [4]. Поэтому примем за основу схему замещения АД (рис. 2), в которой учтены потери в меди и стали статора и ротора, явления вытеснения тока в роторе, а также насыщения магнитных путей по цепи главного магнитного потока и потоков рассеяния.

С учетом этих явлений разработана методика получения указанных на рис. 2 параметров по исходным каталожным данным, типовой характеристике холостого хода АД и принятой по [5] зависимости потерь в стали от явления гистерезиса и вихревых токов. Тогда сопротивление ветви намагничивания можно представить нелинейно зависящим от частоты и тока в ней. Активное сопротивление ветви намагничивания АД состоит из двух составляющих, одна из которых отражает гистерезисные потери, пропорциональные первой степени частоты напряжения, а вторая – потери от вихревых токов, пропорциональные квадрату частоты. Индуктивное сопротивление ветви намагничивания нелинейно зависит от напряжения статора, что учитывается с помощью типовой характеристики холостого хода. Тогда сопротивление ветви намагничивания  $Z_m$  можно представить функцией тока намагничивания и частоты (здесь и далее все параметры схем замещения будем приводить в относительных номинальных единицах):

$$Z_m(\nu, I_m) = (0,8\nu + 0,2\nu^2)R_m + j\nu X_m(I_m). \quad (1)$$

где  $\nu$  - отношение текущей частоты  $\omega$  к номинальной  $\omega_0$ , 0,8 и 0,2 – соответственно весовые коэффициенты

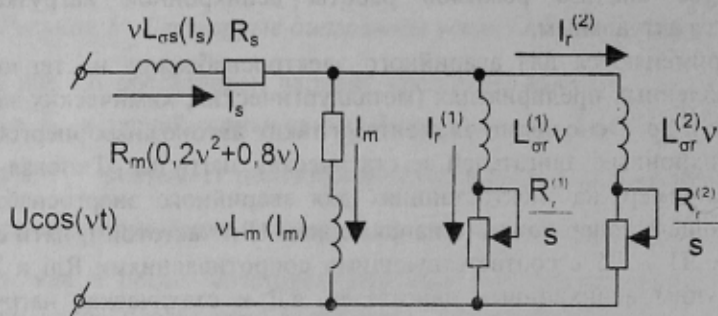


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения асинхронного двигателя при питании напряжением переменной частоты  $\omega = \nu\omega_0$

потерь гистерезисных и от вихревых токов.

Индуктивные сопротивления рассеяния обмоток АД, нелинейно зависящие от соответствующих токов статора и ротора можно учесть, согласно [4], нелинейной зависимостью только сопротивления статорной цепи, как

$$Z_s(I_s) = R_s + j[K_n - (K_n - 1)\exp(I_s(K_n - 1))]\nu X_s, \quad (2)$$

где  $K_n$  – коэффициент насыщения по потокам рассеяния, принимаемый равным 0,6 – 0,95.

Из (2) вытекает, что для АД, у которого, например  $K_n$  равно 0,7, а кратность пускового тока статора составляет 6, при подаче на остановленный двигатель номинального напряжения статора входное сопротивление составит 0,75 от его значения при токе статора, ниже номинального.

В стационарных режимах входное сопротивление двигателя и ток статора при напряжении на шинах  $U_{ш}$  с относительной частотой  $\nu$  можно найти по соотношениям:

$$Z_{АД}(\nu, s, I) = Z_s + (Z_{r1}^{-1} + Z_{r2}^{-1} + Z_m^{-1})^{-1}, \quad I_s(\nu, s) = U_{ш} Z_{АД}(\nu, s, I)^{-1},$$

$$Z_{r1} = \frac{R_{21}}{s} + j\nu X_{21}, \quad Z_{r2} = \frac{R_{22}}{s} + j\nu X_{22}, \quad (3)$$

здесь скольжение  $s$ , необходимое для определения сопротивлений контуров ротора, находится из решения нелинейного уравнения, отражающего равенство вращающего момента АД, являющегося функцией напряжения, частоты и скольжения, а также момента сопротивления АД, зависящего от коэффициента загрузки  $K_3$  и скорости вращения.

$$M(U, \nu, s) - M_c(K_3, \omega^2) = 0, \quad (4)$$

$$\text{где } M(U, \nu, s) = \frac{R_{21}}{s} I_{r1}^2 + \frac{R_{22}}{s} I_{r2}^2.$$

Система уравнений (1-4) нелинейна и для ее решения используются методы решения систем нелинейных уравнений в сочетании с методами итераций.

Анализ переходных, а также и стационарных, процессов в автономной системе будем производить с помощью математической модели, основанной на дифференциальных уравнениях синхронного генератора, асинхронных двигателей и уравнений связи [6]. Все уравнения запишем в системе координат d, q, оси которой совпадают с соответствующими осями генератора и имеют частоту вращения генератора  $\omega_r$ .

Тогда дифференциальные уравнения симметричных по осям асинхронных двигателей для приведенной выше схемы замещения (рис. 2) представим в векторной форме записи как:

$$\begin{aligned} p\bar{\psi}_s &= \bar{u}_s - R_s \bar{i}_s - j\omega_r \bar{\psi}_s, \\ p\bar{\psi}_{r1} &= -R_{r1} \bar{i}_{r1} - j(\omega_r - \omega_{Al}) \bar{\psi}_{r1}, \\ p\bar{\psi}_{r2} &= -R_{r2} \bar{i}_{r2} - j(\omega_r - \omega_{Al}) \bar{\psi}_{r2}, \\ p\omega_{Al} &= J_{Al}^{-1} (M_{Al} - M_C), \\ M_{Al} &= \bar{\psi}_s \times \bar{i}_s. \end{aligned} \quad (5)$$

Дифференциальные уравнения генератора, имеющего несимметрию по осям d и q, представим как

$$\begin{aligned} p\psi_{sd} &= u_{sd} - R_{sd} i_{sd} - \omega_r \psi_{sq}, \\ p\psi_{sq} &= u_{sq} - R_{sq} i_{sq} + \omega_r \psi_{sd}, \\ p\psi_{rd} &= -R_{rd} i_{rd}, \\ p\psi_{rq} &= -R_{rq} i_{rq}, \\ p\psi_f &= u_f - R_f i_f, \\ p\omega_r &= \frac{M_T - M_r}{J}, \\ M_r &= \psi_{ms} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}. \end{aligned} \quad (6)$$

Записав выражения для производных токов для всех присоединений, подходящих к узлам, и приравняв их суммы нулю, согласно первому закону Кирхгофа, получим систему алгебраических уравнений для определения узловых напряжений U1-U5 на секциях C1 - C5:

$$YU = T, \quad (7)$$

где Y, U – матрица узловых инверсных индуктивностей и вектор искомых узловых напряжений;

T – вектор скоростей изменения узловых задающих токов, которые находятся по эквивалентным ЭДС генератора и двигателей, определяемым по результатам решения на каждом шаге расчета дифференциальных уравнений.

Выражения для определения элементов матрицы Y и вектора T приведены в [6]. Для рассматриваемой схемы (рис. 1) матрица Y имеет размер 5 x 5 и ее элементы находятся как:

$$\begin{aligned} y_{11} &= \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \frac{1-a_{sd}}{L_1 + L_{\sigma}}; y_{22} = \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_4} + \sum_1^{k_2} \left( \frac{1-a_s}{L_{\sigma}} \right)_{k_2}; y_{33} = \frac{1}{L_3} + \frac{1}{L_5} + \sum_1^{k_3} \left( \frac{1-a_s}{L_{\sigma}} \right)_{k_3}; \\ y_{44} &= \frac{1}{L_4} + \sum_1^{k_4} \left( \frac{1-a_s}{L_{\sigma}} \right)_{k_4}; y_{55} = \frac{1}{L_5} + \sum_1^{k_5} \left( \frac{1-a_s}{L_{\sigma}} \right)_{k_5}; y_{12} = \frac{1}{L_2}; y_{13} = \frac{1}{L_3}; y_{14} = 0; y_{15} = 0; \\ y_{23} &= 0; y_{24} = \frac{1}{L_4}; y_{25} = 0; y_{34} = 0; y_{35} = \frac{1}{L_5}; y_{45} = 0, \end{aligned}$$

где  $k_2, \dots, k_5$  – соответствующее количество двигателей, установленных на секциях C2 – C5.

Скорости изменения узловых задающих токов  $T$  определяются через эквивалентные узловые ЭДС, создаваемые подключенными к соответствующим узлам асинхронными двигателями (для узлов 2 – 5) и генератором (для узла 1) Например, выражение для эквивалентной ЭДС АД  $i$ -го узла имеет вид [6]:

$$e_3 = a_{21}(-R_{21}\vec{i}_{21} + j\omega\vec{\Psi}_{r1}) + a_{22}(-R_{22}\vec{i}_{22} + j\omega\vec{\Psi}_{r2}).$$

Определение переменных состояния, в качестве которых для генератора и АД принимаются потокосцепления и частоты вращения, а для линий связи - токи, производится путем численного интегрирования дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты. Перед выполнением каждого шага интегрирования определяются напряжения на секциях из системы уравнений (7). Начальные значения переменных находятся из доаварийного режима.

В качестве примера приведем результаты анализа, выполненные по разработанной методике, для системы аварийного энергоснабжения блочного агрегата мощностью 300 МВт. В этой системе используется дизель-генератор напряжением 0,4 кВ мощностью 500 кВт (1500 об/мин; номинальный ток статора 903 А; синхронное, переходное и сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси соответственно равны 1,92; 0,191; 0,14 о.е.) и 10 асинхронных двигателей единичной мощностью от 18,5 до 110 кВт. Двигатели служат для привода маслонасосов турбогенератора и валоповоротного устройства его ротора, запуск которых должен быть обеспечен за минимальное время при потере рабочего и резервного питания в системе электроснабжения с.н. По каталожным данным двигателей (табл. 1) были определены по методике [5] параметры их схем замещения, (табл. 2). В этой таблице указаны в относительных номинальных единицах сопротивления статора, ветви намагничивания и двух контуров ротора, эквивалентно заменяющих глубокий паз. Значение активного и индуктивного сопротивлений ветви намагничивания указаны для номинального режима, когда напряжение и ток статора, а также скольжение АД равны номинальным значениям. Для нелинейных зависимостей индуктивных сопротивлений использовалась типовая характеристика холостого хода АД и соотношение (2).

Таблица 1 – Паспортные данные электродвигателей

Вид механизма	Тип двигателя	$P_{ном},$ кВт	$\omega_{ном},$ об/мин	$\cos\phi_{ном}$	$\eta_{ном}, \%$	$M_{макс.}$ о.е.	$M_{п.}$ о.е.	$I_{п.}$ о.е.
Маслонасос смазки	2М280-6	110	980	0,89	0,925	2,0	1,2	6,0
Маслонасос смазки	А2-92-6У3	75	996	0,88	0,93	2,2	1,1	7,0
Валоповоротное устройство	АОС2-91-4У3	61	1490	0,92	0,87	2,3	1,3	7,0
Маслонасос уплотнений	4А-160М2У3	18,5	2990	0,92	0,885	2,2	1,4	7,0

Таблица 2 – Параметры эквивалентных схем замещения электродвигателей

Тип двигателя	$R_s$	$X_{gs}$	$R_m$	$X_m$	$R_r^{(1)}$	$X_{от}^{(1)}$	$R_r^{(2)}$	$X_{от}^{(2)}$
2М280-6	0,017	0,0714	1,125	4,242	0,0644	0,1229	0,0037	0,206
А2-92-6У3	0,010	0,0714	0,335	3,205	0,0471	0,1292	0,0047	0,231
АОС2-91-4У3	0,019	0,0714	0,744	3,507	0,052	0,1198	0,0082	0,232
4А-160М2У3	0,010	0,077	0,1	4,484	0,0555	0,1498	0,0081	0,185

С помощью разработанной математической модели была сформирована оптимальная очередность последовательного запуска двигателей в аварийном режиме. Характер изменения скоростей вращения двигателей для двух очередей пуска показан на рисунке 3. К секциям С2 – С5 каскадно подключалась асинхронная нагрузка с номинальной мощностью соответственно для первой очереди: С2 – 189,5 кВт и С3 – 154 кВт, а для второй - С4 – 128,5 кВт и С5 – 93,5 кВт. Общее время пуска двух очередей составило 3,2 с.

Методы частотного пуска асинхронной нагрузки моделировались путем задания соответствующих значений напряжения возбуждения  $U_f$  и скорости вращения приводного дизеля  $\omega_f$ . Результаты показывают, что выгодно применять частотный пуск даже при наличии ограничений, накладываемых на допустимую загрузку дизеля. Математическая модель была использована также для определения токов короткого замыкания и выбора уставок устройств релейной защиты и автоматики в автономной системе электроснабжения.

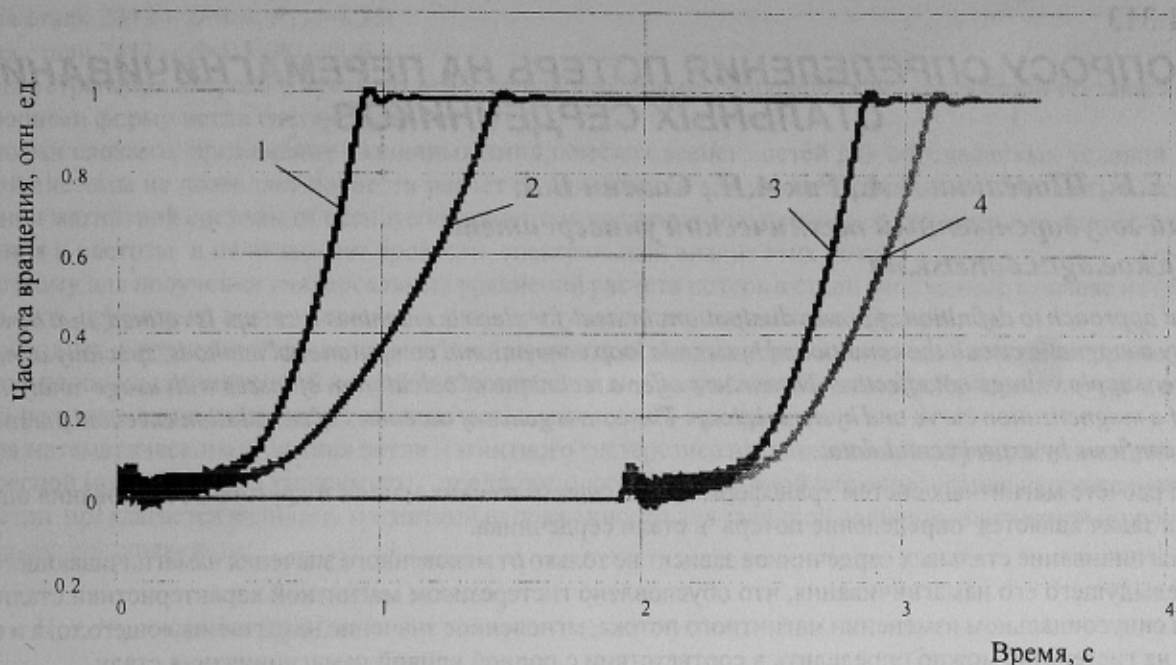


Рисунок 3 – Изменение частот вращения асинхронных двигателей при пуске от генератора ограниченной мощности в сети надежного питания энергоблока мощностью 300 МВт  
 1, 2 – двигатели первой очереди пуска, 3, 4 – двигатели второй очереди пуска.

#### Выводы.

1. Для выполнения расчетов в системе электроснабжения с генераторами ограниченной мощности разработана математическая модель с представлением асинхронных двигателей и генераторов полными дифференциальными уравнениями. Для повышения точности расчета потребляемых мощностей и потерь при отклонениях напряжения и частоты выполнен учет явлений насыщения магнитных цепей и вытеснения токов а асинхронных двигателях.
2. Математическая модель позволяет для аварийных систем электроснабжения сформировать оптимальную очередность запуска двигателей, рассчитать уровни токов КЗ, необходимые для выбора уставок релейной защиты, оценить допустимость и преимущества использования частотного запуска асинхронной нагрузки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей./ Под ред. Мамиконянца Л.Г. Энергоатомиздат, М. 1984. - 240 с.
2. Черновец А.К., Шаргин Ю.М., Семенов К.Н. Математическое моделирование переходных процессов в многомашинных системах электроснабжения электрических станций. – Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1982, №2, с. 60 – 69.
3. Сендюров В.М. Алгоритмизация упрощенных уравнений Парка – Горева автономных электроэнергетических систем. – Электричество, 1976, №1, с. 73-75.
4. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Метод эквивалентирования и расчета короткого замыкания в системе асинхронных машин. Электричество, №1, 1979, с. 45-50.
5. Талал Ал Ас, Математическое моделирование процессов в системе электроснабжения собственных нужд электростанций при отклонениях напряжения и частоты/ Сб. науч. тр. ДонГТУ. Серия «Электротехника и энергетика». – Вып.17. – Донецк, ДонГТУ, 2000. – С. 184 – 189.
6. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в многомашинных системах электроснабжения электрических станций. Донецк, ДПИ, 1984 – 116 с.